



شبیه‌سازی پاسخ سوسوزن‌های غیر آلی به پرتو گاما با کد مونت کار لوی هیبریدی

FLUKA+PHOTRACK

مهدی، فتحی^۱؛ نیما، قلعه^{۲*}؛ داریوش، رضایی اوچبلاغ^۱

۱- دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم، گروه فیزیک

۲- دانشگاه دامغان، دانشکده فیزیک

چکیده:

در این مقاله با استفاده از کد مونت کارلو چندمنظوره FLUKA میزان انرژی ذخیره شده توسط پرتوهای گاما را در یک سوسوزن غیر آلی نوعی محاسبه و سپس با توجه به ناکارآمدی بخش ترابرد نور کد FLUKA، از کد تک منظوره ترابرد نور PHOTRACK برای تعقیب نور و فرایندهای اپتیکی استفاده شده است. نتیجه شبیه‌سازی همخوانی قابل قبولی را با نتایج تجربی نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: سوسوزن، تابع پاسخ، کد FLUKA، قدرت تفکیک، کد PHOTRACK

۱- مقدمه

آشکارسازهای سوسوزن یکی از اساسی‌ترین ابزارها در میان آشکارسازهای تابش برای مطالعات فیزیک بهداشت، استفاده‌های صنعتی و اندازه‌گیری‌های زیست‌محیطی هستند. بکارگیری این سیستم‌ها نیازمند اطلاعات مربوط به هندسه خاص چشمه-آشکارساز، الکترونیک آشکارسازی و روش خاص تجزیه و تحلیل قله است [۱]. سوسوزن‌های غیر آلی در میان سوسوزن‌ها بیشترین نور خروجی را دارند که این امر باعث قدرت تفکیک انرژی (حاصل تقسیم پهنا به میانگین انرژی) بهتر آنها می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که سوسوزن‌های غیر آلی برای آشکارسازی پرتوهای گاما، الکترون‌های پرنرژی و پوزیترون‌ها بسیار مناسب باشند. سوسوزن غیر آلی یدورسیدیم دارای سامانه طیف‌سنجی نسبتاً ارزان قیمت بوده و برخلاف آشکارساز نیمه‌هادی ژرمانیوم در دمای اتاق نیز قابل استفاده است. از این آشکارساز در موارد استفاده متنوع و شرایط آب‌وهوایی نامطلوب (مانند مطالعات چاه‌پیمایی و نظایر آن) استفاده شده است [۲]. سامانه‌های آشکارسازی بر پایه این آشکارساز به علت عدد اتمی بالای ید ($Z=53$) و چگالی مناسب بلور (3.67 gr/cm^3)، ضریب جذب بالایی برای آشکارسازی پرتوهای گامای پرنرژی از خود نشان می‌دهند و به همین علت یک قله فوتوالکترونیک کاملاً متمایز نسبت به پیوستار کامپتون دارند [۳]. این آشکارساز به عنوان آشکارساز پایه در اکثر آزمایشگاه‌های تابش یافت می‌شود در حالیکه سایر سوسوزن‌ها برای کاربردهای خاص استفاده می‌شوند. برای مثال سوسوزن‌های پلاستیکی به خاطر پاسخ سریع آنها در اندازه‌گیری‌های زمانی استفاده می‌شوند که مورد بکارگیری آنها به عنوان حفاظ‌های فعال در سامانه‌های فرونشانی کامپتون [۴] و نیز مطالعات زمان پرواز [۵] تنها مثالهایی از این کاربردهای

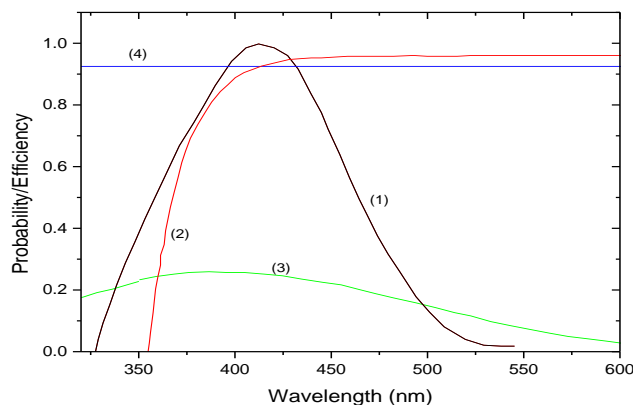


زمانگیری است. در این مطالعه کد فلوکا بعلت و ویژگی دنبال کردن ذره به صورت رویداد به رویداد برای ترابرد پرتوهای گاما و نهایتاً انباشت انرژی گاماها مورد استفاده قرار گرفته است. باید توجه داشت که خروجی‌هایی که بصورت میانگین انرژی برای کل ذرات گاما است به کد ترابرد ذرات و نور اجازه اتصال را نمی‌دهد. شبیه‌سازی ترابرد نور شامل همه توابع وابسته به طول موجی است که بوسیله کد PHOTRACK شناخته شده‌اند می‌باشد [۶].

شبیه‌سازی کامل پاسخ سوسوزن به تابش گاما در سه فاز مجزا دسته بندی می‌شود: (الف) شبیه‌سازی ترابرد گاما بوسیله کد FLUKA (ب) شبیه‌سازی ترابرد نور با استفاده از کد مستقل ترابرد نور PHOTRACK (ج) پیچش قدرت تفکیک گاوسی در طیف بدست آمده از فازهای (۱) و (۲) ناشی از الکترونیک و PMT.

۲- شبیه سازی ترابرد نور با کد PHOTRACK

کد شبیه‌سازی ترابرد نور PHOTRACK بر اساس قوانین اپتیک هندسی و الکترومغناطیس کلاسیک کار کرده و فرآیندهای زیر را با اعمال وابستگی به طول موج (شکل ۱) شبیه‌سازی می‌کند. (۱) تولید نقاط گسیل نور کاتوره‌ای (۲) انتخاب جهت گسیل نور (۳) اعمال تضیف نور به شکل $I(x) = I \cdot \exp(-x/L(\lambda))$ (۴) شبیه‌سازی انعکاس از دیواره‌های سوسوزن یا هدایت کننده‌ی نور (۵) ثبت فوتون‌هایی که به PMT وارد می‌شوند [۶].



شکل ۱: وابستگی به طول موج پارامترهای اپتیکی (۱) منحنی احتمال گسیل NaI(Tl) (۲) انعکاس رنگ (۳) ضریب شکست ماده سوسوزن NaI(Tl) (۴) بهره کوانتومی فوتوکاتد

۳- کد مونت کارلوی FLUKA

در این پژوهش، شبیه‌سازی مونت کارلوی آشکارساز و جزئیات هندسه با استفاده از کد FLUKA انجام شده است. FLUKA، یک کد مونت کارلو چندمنظوره برای شبیه‌سازی برهم‌کنش‌ها و ترابرد حدود ۶۰ ذره متفاوت

از هادرونها و یون‌های سنگین گرفته تا تابش‌های الکترومغناطیس با محدوده انرژی چند کیلوالکترون‌ولت تا گیگاالکترون‌ولت و در همه اشکال فیزیکی ماده است [۷-۸].

در این کد کاربر باید هندسه، مواد، موقعیت و انرژی چشمه را از طریق ابزارهای به نام کارت برای مسئله تعیین کند. در این مطالعه، از سوسوزن NaI(Tl) استوانه‌ای 2×2 که در معرض چشمه‌های گامای سزیم-۱۳۷ قرار گرفته استفاده شده است. سلول سوسوزن به حجمک‌های مکعبی کوچک با ابعاد قابل مقایسه با مسافت آزاد میانگین تابش گامای ثانویه (۰/۱۵ cm) تقسیم شده است. انرژی ذخیره شده در هر سلول توسط کارت **EVENTBIN** بعد از هر واقعه و برای هر تاریخچه ذره محاسبه می‌شود [۹]. این کارت، انرژی ذخیره شده را در حجمک‌های مشخص درون سلول سوسوزن ثبت و انرژی ثبت شده در حجمک‌های مختلف سلول را برای هر ذره ورودی و با ساختار رویداد به رویداد ثبت می‌کند.

EVENTBIN		Unit: 21 ASC ▼	Name: eventbin
Type: X-Y-Z ▼	Xmin: -2.54	Xmax: 2.54	NX: 15
Part: ENERGY ▼	Ymin: -2.54	Ymax: 2.54	NY: 15
Print: All Cells ▼	Zmin: 0	Zmax: 5.08	NZ: 15

شکل ۲: شکل کارت **eventbin** برای آشکارساز سوسوزن یدورسدیم با اندازه 2×2 که در آن بازه‌های x ، y ، z و تعداد حجمک‌بندی در هر راستا مشخص است.

خروجی این کارت دارای فرمت مشخص بوده و انرژی گامای اولیه را در لحظه برهم‌کنش در یک ناحیه از آشکارساز و در حجمک مربوطه ثبت می‌کند. حال آنکه برای شبیه‌سازی پاسخ آشکارساز، شماره حجمک، x ، y و z مرکز حجمک و انرژی هر حجمک موردنیاز است. بدین منظور، پس از اتمام کار در فلوکا، مقادیر خروجی این کارت توسط یک برنامه فرترن پردازش شده و در انتها یک خروجی به صورت شماره حجمک، مختصات x ، y و z مرکز آن و انرژی ذخیره شده در هر حجمک را بدست آورده و خروجی برنامه که در حقیقت طیف شبیه‌سازی مربوط به چشمه مورد نظر است، رسم می‌شود. شکل ۳، میزان انرژی ذخیره شده در حجمک‌های از پیش تعیین شده را نشان می‌دهند که توسط کارت **userbin** کد فلوکا بدست آمده است.

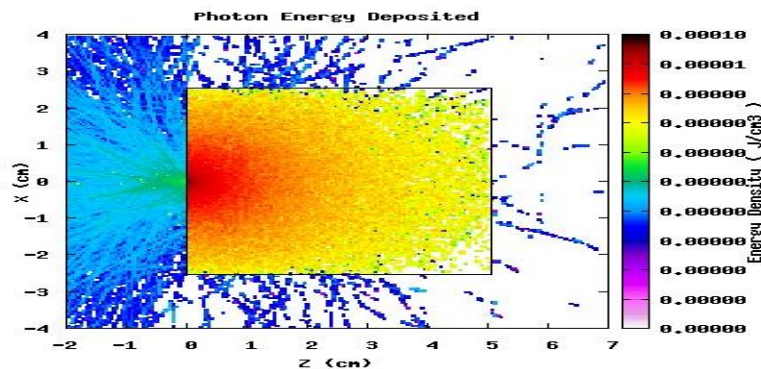
مقادیر خروجی کارت **EVENTBIN** در ضریب تبدیل انرژی به نور ضرب می‌شود که این خود، تعداد فوتون‌های مرئی که باید در هر سلول تولید شوند را تعیین می‌کند. در گام بعدی، شبیه‌سازی ترابرد نور باید انجام شود. به علت ناکارآمدی‌های زیر، از کد **PHOTRACK** به جای کد **FLUKA** برای شبیه‌سازی ترابرد نور استفاده شده است [۹]:

(الف) کد **FLUKA** چشمه فوتون مرئی را نمی‌تواند شبیه‌سازی کند (فوتونهای مرئی را ترابرد می‌کند)، از این رو مقایسه نتایج آن با شبیه‌سازی‌های معتبری مثل (شولرمن و کلاین) ممکن نیست.

(ب) کارت **OPT-PROP** کد **FLUKA**، خواص اپتیکی سوسوزن (مثل ضریب شکست، ضریب تضعیف، انعکاس رنگ و ...) را به صورت مقادیر ثابت در نظر می‌گیرد در حالیکه همگی توابعی از طول موج نور



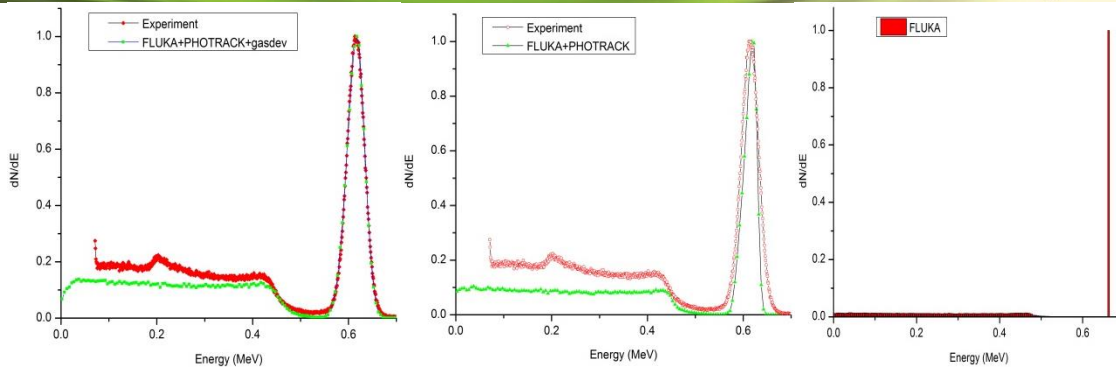
سوسوزن هستند. در یک تقریب واقع گرایانه‌تر زیرروالهای کد FLUKA مانند ABSCFF ، RFRNDX و DFFCFF می‌توانند به ترتیب برای نشان دادن ضرایب شکست، جذب (یا تضعیف نور) و انعکاس پخشی به کار برده شوند، ولی در بهترین حالت فقط سه طول موج مجزا و گسسته را می‌توانند در نظر بگیرند. (ج) زیرروالهای مفیدی مانند RFLCTV, FRGHNS و QUEFFC که مسئولیت انعکاس، ناهموازی سطح و بهره‌ی کواتومی فوتوکاتد را برعهده دارند یا ناکاملند یا هنوز قابل اجرا نیستند.



شکل ۳: توزیع فضایی انرژی ذخیره شده فوتون‌های گسیلی از یک چشمه همسانگرد ^{137}Cs در مجاورت یک سوسوزن NaI(Tl) .

با داشتن هندسه سوسوزن، خواص اپتیکی (وابسته به طول موج)، شماره‌ی سلول و تعداد فوتون‌های مرئی که در هر سلول باید تولید شوند (۱۰۰۰ فوتون مرئی در این پژوهش)، کد PHOTRACK درنهایت با شبیه‌سازی کلیه فرایندها، وزن فوتون‌های مرئی رسیده به سطح فوتوکاتد را محاسبه می‌کند. به این ترتیب می‌توان اصطلاحاً یک جدول از وزن‌های فوتون‌های مرئی برای هر حجمک از سوسوزن در اختیار داشت. با استفاده از جدول مذکور و عمل تبدیل انرژی به نور، نور کل تراپرد شده به فوتوکاتد برای هر تابش گاما به صورت انفرادی محاسبه می‌شود. هنگامی که همه فرایندها برای تعداد زیادی از تابش‌های گامای فرودی تکرار شد، رسم فراوانی فوتون‌های مرئی، مانسته طیف ارتفاع پالس سوسوزن خواهد بود.

یک پهن‌شدگی اضافی نیز باید بر روی طیف شبیه‌سازی بدست آمده اعمال نمود که در حقیقت قدرت-تفکیک انرژی PMT (که می‌تواند مربوط شود به ناهمگنی سطح فوتوکاتد، و نیز تکثیر الکترون در زنجیره داینودی) و الکترونیک مربوطه را شبیه‌سازی می‌کند. این قدرت تفکیک اضافی اساساً با پیچش یک تابع توزیع-گوسی (به صورت برنامه‌نویس به زبان فرترن و توسط برنامه gasdev) در توزیع خروجی FLUKA + PHOTRACK انجام می‌شود.



شکل ۴: تابع پاسخ سوسوزن یدورسدیم برای چشمه سزیم-۱۳۷

شکل ۴ یک نمودار مقایسه‌ای است که خروجی FLUKA (در سمت راست)، طیف مقایسه‌ای FLUKA+PHOTRACK با طیف تجربی (در مرکز) و طیف مقایسه‌ای حاصل از شبیه‌سازی با اعمال پهن‌شدگی اضافی با طیف تجربی (در سمت چپ) در آن دیده می‌شود، که در آن افزایش پهن‌شدگی در اثر ترابرد نور با کد (FLUKA + PHOTRACK) در قیاس با کد FLUKA بوضوح دیده می‌شود. اگرچه مقایسه‌ها، توافق خیلی خوبی را در اطراف لبه‌ی کامپتون و ناحیه قله‌ی تمام انرژی نشان می‌دهد، اختلاف در دامنه‌های پایین در اثر مواد محصورکننده‌ی آزمایش و نوفه الکترونیک که معمولاً در ناحیه‌های کم انرژی طیف غالب هستند، وجود دارد.

۴- نتیجه‌گیری

تابع پاسخ سوسوزن NaI(Tl) به تابش‌های گاما را می‌توان با کد هیبریدی FLUKA + PHOTRACK شبیه‌سازی نمود. در ناحیه فوتوالکتریک که نماینگر قله تمام انرژی ذخیره شده در آشکار ساز است نتایج این شبیه‌سازی همخوانی خوبی را با تجربه دارد. اما در ناحیه پیوستار کامپتون نتایج شبیه‌سازی شده مقداری متفاوت از نتایج تجربی هستند. همچنین به نظر می‌رسد استفاده از ترابرد نور وابسته به کل بازه طول موج برای داشتن یک کد شبیه‌سازی دقیق ضروری است.

۵- منابع

- [۱] M. Niraula, D. Mochizuki, T. Aoki, Y. Tomita, T. Nishashi, Y. Hatanaka, Fabrication and performance of p-i-n CdTe radiation detectors, Nucl. Instr. Meth. A ۴۳۶, ۱۳۲-۱۳۷ (۱۹۹۹).
- [۲] M. Rasoulinejad, R. Izadi Najafabadi, N. Ghal-Eh, A simple well-logging tool using boron-lined sodium iodide scintillators and an ^{241}Am -Be neutron source, Radiat. Prot. Dosim., ۱۵۱, ۵۸۰-۵۸۵ (۲۰۱۲).
- [۳] N. Tsouflanis, Measurement and Detection of Radiation. McGraw-Hill, New York, ۱۹۸۳.



- [۴] A. T. Farsoni, B. Alemayehu, A. Alhawsawi, E. M. Becker, A compton-suppressed phoswich detector for gamma spectroscopy, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, ۱-۶ (۲۰۱۳).
- [۵] A. Raymond, J. Ellsworth, Improved neutron time of flight apparatus, Bulletin of the American Physical Society, ۵۸ (۲۰۱۳).
- [۶] N. Ghal-Eh, M.C. Scott, R. Koochi-Fayegh, M. F. Rahimi, ۲۰۰۴. A photon transport model code for use in scintillation detectors. Nucl. Instrum. Meth. A ۵۱۶, ۱۱۶-۱۲۱ (۲۰۰۴).
- [۷] G. Battistoni et al., The FLUKA code: Description and benchmarking, Proceedings of the Hadronic Shower Simulation Workshop ۲۰۰۶, Fermilab ۶-۸ September ۲۰۰۶, M. Albrow, R. Raja (Eds.), AIP Conference Proceeding, ۸۹۶ pp. ۳۱-۴۹.
- [۸] A. Fasso et al., FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-۲۰۰۵-۱۰, INFN/TC_۰۵/۱۱, SLAC-R-۷۷۳, (۲۰۰۵).
- [۹] FLUKA manual, p. ۳۳۸, <http://www.fluka.org>.